

Ю.В.КРАВЧЕНКО, аспирант, НТУ «ХПИ»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ДЛЯ КОНДЕНСАТОРНОЙ СИСТЕМЫ С КОМБИНИРОВАННОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

Числовим методом визначені коефіцієнти посилення електричного поля для конденсаторної системи з комбінованою двохшаровою ізоляцією та різною геометрією форми краю обкладки. Проведено аналіз залежностей, що встановлюють зв'язок значення коефіцієнта посилення поля від основних геометричних параметрів конденсаторної системи та діелектричних проникностей шарів ізоляції. Отримані нові, уточнені залежності.

The electric field strengthening coefficients for capacitor system with combined double-layer insulation and for different geometrical configuration of plate edge are determined by numerical method. The analysis of field strengthening coefficients dependences from basic geometrical characteristics of capacitor system and insulation layers dielectric permittivity are made. The new specified dependences are obtained.

Актуальность. Ресурсные характеристики высоковольтных импульсных конденсаторов с высокими удельными характеристиками определяются преимущественно процессами, происходящими вблизи края обкладки. Наиболее значительное разрушающее влияние «краевой эффект» оказывает на слои твердой изоляции. Жидкий диэлектрик, примыкающий к торцу обкладки, способен к восстановлению своих электрических характеристик в местах с наибольшей напряженностью поля и интенсивностью частичных разрядов за счет возможности свободного перемещения молекул жидкости. Разрушения же в твердой изоляции постоянно аккумулируются, что приводит, в конечном счете, к полному ее пробою.

Согласно теории напряженного объема [1] рассматриваемый интервал расстояний от края обкладки r , на который приходятся основные процессы разрушения составляет: $r = (0,005 \div 0,05)d$. Вычисленные ранее в [2] коэффициенты усиления поля (K_u) на поверхности скошенного края обкладки конденсатора с учетом комбинированной структуры диэлектрика на данном интервале изменения r не обеспечивают необходимой точности результатов [3].

Таким образом, актуальность данной работы заключается в уточнении значений коэффициента усиления электрического поля на интересующем интервале r , а также уточнении имеющихся и получении новых эмпирических формул, описывающих зависимость K_u от конфигурации расчетной конденсаторной системы и диэлектрических проницаемостей слоев изоляции.

Цель работы. Определение коэффициентов усиления электрического

поля на интервале $r = (0,005 \div 0,05)d$ для различных исходных данных рассматриваемой конденсаторной системы, лежащих в определенных диапазонах. Анализ существующих и получение новых эмпирических формул изменения K_y в зависимости от параметров конденсаторной системы.

Постановка задачи. Упрощенные модели края обкладки, используемые при определении коэффициента усиления поля, представлены на рис. 1. При решении задачи рассматривались обкладки со скошенной формой торца с углом раскрытия кромки α (рис. 1, а) и закругленной, с радиусом закругления R равным половине толщины обкладки (рис. 1, б). Обе модели представляют собой системы, включающие электрод толщиной h , находящийся под потенциалом U_0 и расположенный между двумя бесконечными электродами с нулевым потенциалом. К торцу обкладки примыкает прослойка диэлектрика с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_1 , а между обкладками, расстояние между которыми d , расположена изоляция с ϵ_2 . Характерный диапазон изменения геометрических размеров и соотношения диэлектрических проницаемостей был выбран на основе реально используемых в проектировании конденсаторов и составляет: $r/d = 0,005 \div 0,05$; $h/d = 0,1 \div 0,5$; $\epsilon_1/\epsilon_2 = 0,2 \div 5$; $\alpha = 30 \div 90^\circ$.

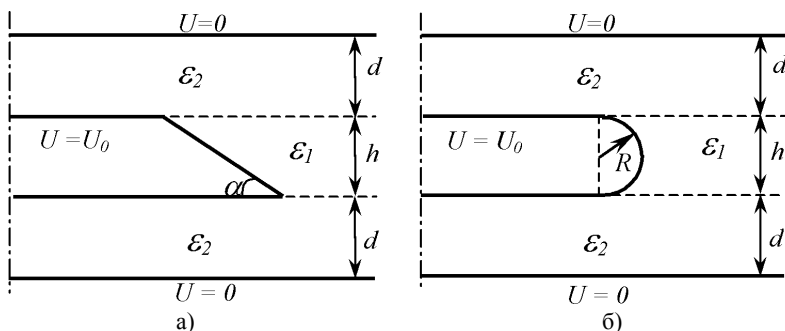


Рисунок 1 – Упрощенные расчетные модели края обкладки:
а) со скошенным торцом; б) с закругленным торцом

Необходимо определить коэффициенты усиления поля на поверхности соприкосновения конденсаторной обкладки с твердой изоляцией вблизи края обкладки ($r/d \leq 0,05$). Проследить зависимость изменения значений K_y при варьировании исходных данных. Получить отображение данных зависимостей в виде эмпирических формул.

Методика решения. Для определения напряженности электрического поля в электростатическом приближении использованы следующие граничные условия: $U = U_0$ – потенциал конденсаторной обкладки, $U = 0$ – потенци-

ал двух бесконечных электродов, между которыми находится обкладка.

Задача решена методом интегральных уравнений [4] с использованием уравнений Фредгольма первого рода (для потенциалов) и второго рода (для условия равенства нормальных составляющих вектора электростатической индукции на поверхностях раздела сред)

Для реализации компьютерной программы использованы подпрограммы, приведенные в пособии [4]. Результатами расчета являются значения напряженности электрического поля на поверхности электродов и нормальные составляющие напряженности электрического поля на поверхности границ раздела диэлектрических сред.

Повышение точности вычислений в области $r = (0,005 \div 0,05)d$ было достигнуто за счет программной реализации рекомендаций [5], учитывающих известный качественный характер изменения функции $E(x)$, как функции, быстро нарастающей у края электрода. Расположение узлов интегрирования с учащением на сходящихся расчетных границах позволило получить в наиболее интересующей нас области вблизи края обкладки шаг интегрирования порядка $0,001 h$, что обеспечило необходимую точность расчета напряженности поля.

На основании полученных значений напряженности находим значения коэффициентов усиления поля по формуле:

$$Ky = \frac{E_i}{E_B^*}, \quad (1)$$

где E_i – напряженность поля для данной конфигурации расчетной системы;

E_B^* – базовое значение напряженности поля на расстоянии r от края обкладки.

Наиболее часто в качестве базового принимается значение напряженности поля, определенное для случая однородного диэлектрика ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2$) и данной конфигурации системы. В то же время, интересным является и определение коэффициента усиления поля данной расчетной системы с углом скоса торца обкладки $\alpha_i = 30 \div 90^\circ$ по отношению к идентичной конструкции, но с прямоугольной формой торца обкладки. В подобном случае суммарный коэффициент усиления составит:

$$Ky_\Sigma = Ky \cdot K_\alpha, \quad (2)$$

где K_α – коэффициент усиления одной расчетной системы (с $\alpha = \alpha_i$ и $E_B^* = E_{B,2}^*$) по отношению к другой ($\alpha = 90^\circ$ и $E_B^* = E_{B,1}^*$) при $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$, то есть

$$K_\alpha = \frac{E_{B,1}^*}{E_{B,2}^*}.$$

Результаты расчетов. Согласно выше приведенной методике был произведен расчет значений коэффициентов усиления поля для различных комбинаций исходных данных. Особенное внимание было уделено определению Ky для следующих расчетных систем:

- с прямоугольной формой торца обкладки (из-за наличия значительного числа данных различных авторов по расчету полей в подобных системах);
- со скошенным торцом обкладки, с $\alpha = 30^\circ$ (так как, согласно [6], подобная форма торца обкладки является преобладающей для фольговых обкладок реальных секций конденсаторов);
- с полукруглой формой торца обкладки (что моделирует случай, когда для снижения «краевого эффекта» производят загибание края фольговой обкладки по всей ее длине при производстве мотанных конденсаторных секций).

Полученные в ходе расчетов значения коэффициентов усиления поля для крайних и ряда промежуточных точек диапазона исходных данных позволили, основываясь на наблюдаемых закономерностях изменения Ky и пользуясь стандартным набором аппроксимирующих функций программного пакета Microsoft Excel, получить эмпирические формулы для описания зависимости $Ky = f(r/d, h/d, \varepsilon_1, \varepsilon_2)$. Для случая прямоугольной формы торца обкладки полученная эмпирическая формула имеет вид:

$$Ky = (1 + |\lambda| \cdot k_r \cdot k_h)^n, \quad (3)$$

$$\text{где } \lambda = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2};$$

$$k_r = -0,125 \cdot \ln(r/d) - 0,2;$$

$$k_h = \sqrt{1 + 0,5 \cdot h/d \cdot |\ln(r/d)|};$$

$$n = 1 \text{ при } \lambda \leq 0, \quad n = 1,3 \cdot e^{6r/d} \cdot (1 + 0,005/\lambda^3) \text{ при } \lambda > 0.$$

При определении значения Ky по формуле (3) погрешность вычислений по сравнению с численным методом расчета поля на всем интервале исходных данных не превышает 5 %, что является приемлемым при использовании данной формулы для инженерных расчетов.

На рис. 2 представлены зависимости коэффициента усиления поля от расстояния до края обкладки для прямоугольной формы торца. Здесь, кривые 1,3 отображают результаты, полученные на основании проведенного расчета электрического поля численным методом; кривые 2,4 представляют зависимость $Ky = f(r/d, h/d, \varepsilon_1, \varepsilon_2)$, построенную на основе формулы (3). Кривые 1 и 2, 3 и 4 практически совпадают, что подтверждает незначительность вносимой использованием формулы (3) погрешности при определении величины Ky .

Кривые 5 и 6 построены по результатам, полученным в работе [4]. Они

существенно расходятся с кривыми 1-4, особенно в области малых r/d (до 10 %). Указанное расхождение обусловлено различием расчетных моделей (в работе [4] границы раздела сред криволинейные) и погрешностью, обусловленной кусочно-линейной аппроксимацией поверхностных зарядов на поверхностях раздела сред.

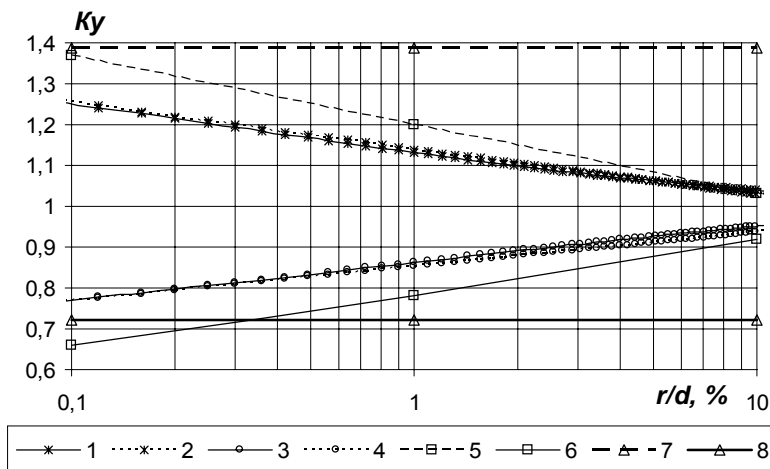


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента усиления поля от расстояния до края обкладки ($\alpha = 90^\circ$; $h/d = 0,1$; для кривых 1, 2, 5, 7 – $\varepsilon_1 = 1$; $\varepsilon_2 = 2$; для кривых 3, 4, 6, 8 – $\varepsilon_1 = 2$; $\varepsilon_2 = 1$)

Кривые 7 и 8 построены по формулам определения коэффициента усиления для двухслойной структуры конденсаторной изоляции, приведенным в работе [5] при $r/d \rightarrow 0$. Однако, отсутствие в данных формулах коэффициента, учитывающего зависимость $Ky = f(r/d)$, в то время как изменение параметра r/d существенно влияет на величину Ky (о чем свидетельствует характер кривых 1-6, рис. 2), что позволяет получить значение коэффициента усиления поля только в одной, удаленной от края обкладки на расстояние r , точке. Данный факт ограничивает область применения формул, приведенных в работе [5].

Аналогично формулам (3) были получены формулы для определения коэффициента усиления при варьировании комбинаций исходных данных для расчетной системы со скошенным торцом обкладки, с $\alpha = 30^\circ$:

$$Ky = (1 + \lambda \cdot k_r / k_h)^n, \quad (4)$$

$$\text{где } \lambda = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2};$$

$$k_r = 0,05 \cdot \ln(r/d);$$

$$k_h = \sqrt{1 + \frac{2}{10^4 \cdot (h/d - 0,4 \cdot r/d)^3}}, \text{ при } \lambda \leq 0; \quad k_h = 1 \quad \text{при } \lambda > 0;$$

$$n = 1 \quad \text{при } \lambda \leq 0, \quad n = 2,45 \cdot \lambda \cdot e^{-0,5r/d} \quad \text{при } \lambda > 0.$$

На рис. 3 представлены результаты определения коэффициента усиления электрического поля для расчетной системы с углом скоса торца обкладки 30° . Кривые 1, 3 представляют результаты определения K_u по формуле (4), кривые 2, 4 – по итогам расчета поля численным методом. Совпадение кривых 1 и 2, 3 и 4 свидетельствует о возможности использования формул (4) для расчета коэффициентов усиления поля вместо расчетов численными методами с незначительным расхождением итоговых результатов.

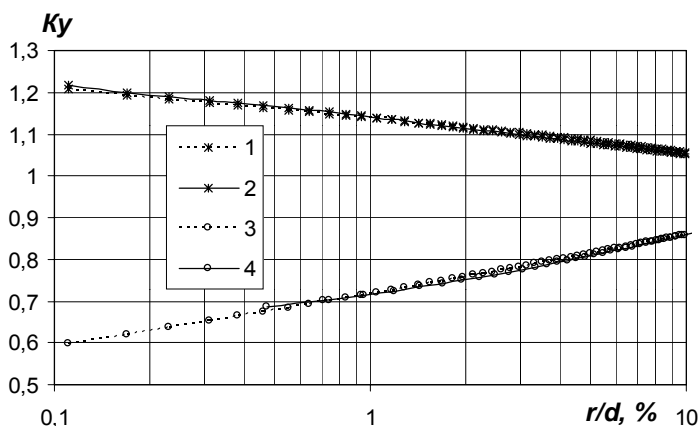


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента усиления поля от расстояния до края обкладки ($\alpha = 30^\circ$; $h/d = 0,1$; для кривых 1, 2 – $\varepsilon_1 = 1$; $\varepsilon_2 = 5$; для кривых 3, 4 – $\varepsilon_1 = 5$; $\varepsilon_2 = 1$)

Сравнение полученных значений K_u для расчетных систем с $\alpha = 90^\circ$ и $\alpha = 30^\circ$ показывает (рис. 4), что при идентичных параметрах расчетных систем коэффициент усиления поля в точках равноудаленных от края обкладки при $\lambda > 0$ будет существенно больше для обкладки с прямоугольной формой торца. В тоже время, суммарный коэффициент усиления $K_{u_{\Sigma 30^\circ}}$ (кривая 3, рис. 4), определяемый по формуле (2), на всем диапазоне рассматриваемых значений λ будет превышать значения K_u для случая $\alpha = 90^\circ$ (кривая 1, рис. 4). Для определения k_α , фигурирующего в качестве сомножителя в выражении (2), для данного конкретного случая сравнения конструкций с $\alpha = 90^\circ$ и $\alpha = 30^\circ$ была получена формула, имеющая вид:

$$k_{\alpha} = (0,145 \cdot h/d + 0,83) \cdot (r/d)^{-0,1}. \quad (5)$$

Характер изменения кривых на рис. 4 демонстрирует существенную зависимость значения коэффициента усиления поля от величины угла раскрытия кромки, α . В тоже время, со снижением α наблюдается уменьшение влияния на Ky параметров r/d , h/d , ε_1 , ε_2 . Таким образом, при $\alpha \rightarrow 0 \Rightarrow Ky \rightarrow 1$, а суммарный коэффициент усиления по отношению к результатам расчета в системе с прямоугольной формой торца обкладки будет $Ky_{\Sigma} \rightarrow \infty$. Следовательно, при малых углах α усиление поля, связанное с формой торца края обкладки превалирует над влиянием на значение Ky остальных параметров расчетной системы (r/d , h/d , ε_1 , ε_2).

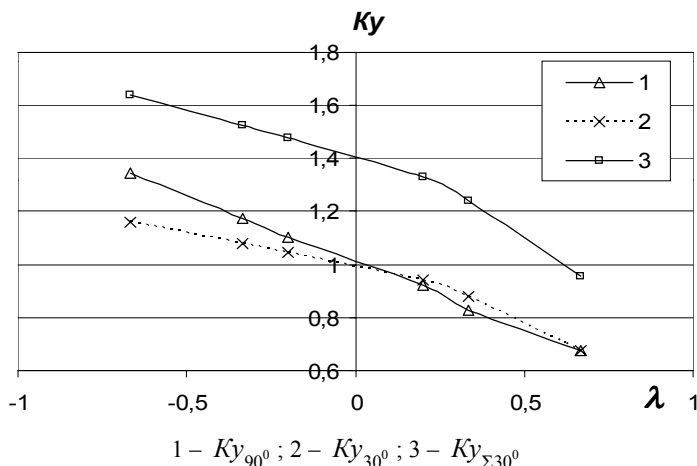


Рисунок 4 – Сравнение коэффициентов усиления поля для расчетных систем с $\alpha = 90^\circ$ и $\alpha = 30^\circ$ ($r/d = 0,005$; $h/d = 0,1$)

На рис. 5, 6 представлены зависимости Ky и $E^* = E_i/E_0$ (где E_i – значение напряженности в данной точке, а $E_0 = U_0/d$) от расстояния r/d для расчетных систем с идентичными значениями h/d , ε_1 , ε_2 , но различной формой торца обкладки: полукруглой (кривая 1, рис. 5, 6), скошенной с $\alpha = 30^\circ$ (кривая 2, рис. 5, 6), прямоугольной (кривая 3, рис. 5, 6).

Согласно рис. 5 наименьшие значения коэффициента усиления поля для равноудаленных от края обкладки точек будут соответствовать варианту со скошенной формой торца обкладки с $\alpha = 30^\circ$ (кривая 2, рис. 5). С другой стороны, этому же варианту соответствуют наибольшие значения напряженности электрического поля (кривая 2, рис. 6), что свидетельствует о существенной неоднородности, вызываемой данной формой торца обкладки. Наилучшее же распределение поля соответствует случаю с полукруглой формой торца обкладки (кривая 1, рис. 6).

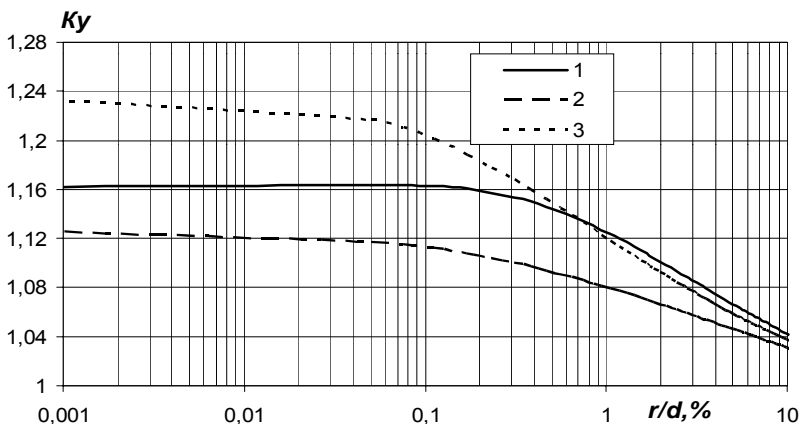


Рисунок 5 – Зависимость $K_y = f(r/d)$ для расчетных систем с различной формой торца обкладки ($h/d = 0,1$; $\varepsilon_1 = 1$; $\varepsilon_2 = 2$)

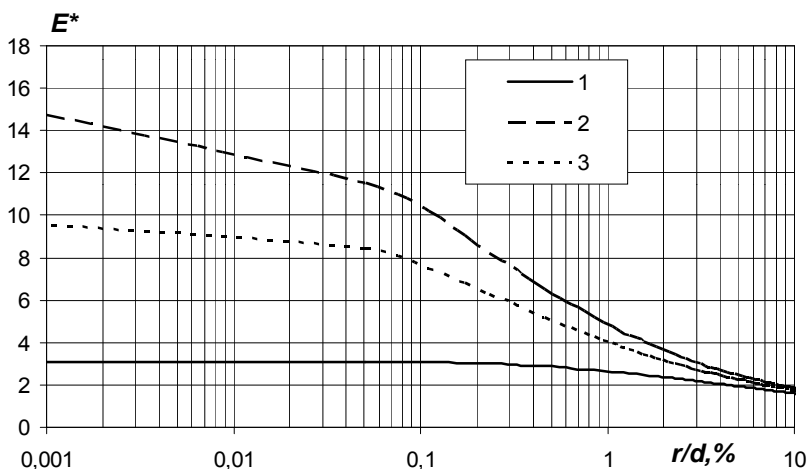


Рисунок 6 – Зависимость $E^* = f(r/d)$ для расчетных систем с различной формой торца обкладки ($h/d = 0,1$; $\varepsilon_1 = 1$; $\varepsilon_2 = 2$)

Выводы.

- 1 Были получены эмпирические формулы для определения коэффициента усиления поля для расчетных конденсаторных систем с прямоугольной и скошенной ($\alpha = 30^\circ$) формой торца обкладки, позволяющие с достаточно высокой степенью точности определять значения K_y , не прибегая к численным методам расчета напряженности поля.
- 2 Значения коэффициента усиления поля для случая $\alpha = 30^\circ$ существ-

- венно менее зависят от величин параметров исходных данных (r/d , h/d , ε_1 , ε_2) по сравнению со случаем прямоугольной формы торца обкладки. Данный факт подтверждается сравнением коэффициентов в формулах определения K_u для этих двух случаев, а также характером изменения кривых на рис. 4.
- 3 Суммарный коэффициент усиления поля конденсаторной системы с $\alpha = 30^\circ$ по отношению к расчетной системе с $\alpha = 90^\circ$ при любых комбинациях исходных данных (в рассматриваемом диапазоне) всегда превышает K_u , соответствующий случаю $\alpha = 90^\circ$.
 - 4 Наилучший характер распределения электрического поля на горизонтальной поверхности обкладки вблизи ее края соответствует варианту с полукруглой формой торца обкладки.
 - 5 Полученные зависимости коэффициента усиления позволяют провести сравнительный анализ распределения напряженности электрического поля в новых современных диэлектрических системах высоковольтных импульсных конденсаторов без предварительных расчетов [6].

Список литературы: 1. Рудаков В.В. Механизм разрушения конденсаторной изоляции // Техническая электродинамика. – 1998. – № 6. – С. 10-15. 2. В.В.Рудаков, Ю.В.Кравченко, В.О.Лысенко «Краевой эффект» у скошенного края обкладки конденсатора // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХП». – 2007. – № 34. – С. 85-92. 3. Ю.В.Кравченко Расчет электрического поля для конденсаторной системы со скругленной кромкой края обкладки // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХП». – 2008. – № 44. – С. 84-90. 4. Набока Б.Г. Расчеты электростатических полей в электроизоляционной технике. – К.: ИСИО, 1995. – 120 с. 5. Рудаков В.В., Конотов В.В., Пенцов В.М. Краевой эффект в конструкции конденсаторного типа с неоднородным диэлектриком // Электропромышленность. Сер. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы. – 1978. – Вып. 6. – С. 11-12. 6. Гребенников И.Ю., Гунько В.И., Дмитришин А.Я. и др. Исследование зависимости ресурса высоковольтных импульсных конденсаторов с пленочным диэлектриком от режима эксплуатации // Электротехника. – 2006. – № 6. – С. 38-41.

Поступила в редколлегию 24.03.2009.